

ОТЗЫВ

официального оппонента Палто Сергея Петровича на диссертацию Бурдуковой Ольги Александровны «Лазеры на красителях видимого спектрального диапазона с полупроводниковой накачкой», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – Оптика

Диссертация О.А. Бурдуковой относится к современной области Оптики, и посвящена разработке и исследованию эффективных перестраиваемых лазеров на красителях с использованием оптической накачки от полупроводниковых лазерных диодов.

Перестраиваемые лазеры занимают особую нишу в мире лазерных источников света. Возможность перестройки длины волны излучения является важнейшим свойством не только при проведении исследований в разных областях современной Оптики такой, например, как лазерная спектроскопия, но и для практических применений в многочисленных фотонных устройствах – там, где требуется управление параметрами монохроматического излучения в широком спектральном диапазоне. Перестраиваемые лазерные устройства широко применяются и в такой социально значимой области, как медицина.

Лазеры на красителях относятся к самым первым источникам перестраиваемого лазерного излучения, созданным еще в середине 1960-х годов. В настоящее время существуют перестраиваемые лазеры, использующие и отличные от растворов красителей материалы в качестве активной среды. Например, большое распространение получили перестраиваемые твердотельные титан-сапфировые лазеры, охватывающие широкий спектральный диапазон, начиная от красной области видимого диапазона (~650 нм) и заканчивая ближним ИК диапазоном (~1100 нм). Однако, что касается основной части видимого спектрального диапазона, а также ближней ультрафиолетовой области спектра, то здесь лазеры на красителях по-прежнему занимают лидирующее положение. Множество полупроводниковых лазеров, созданных в последние годы для данного спектрального диапазона, характеризуется лишь дискретным набором длин волн излучения. Однако создание достаточно мощных и дешевых

полупроводниковых лазерных источников с дискретным набором длин волн генерации создало предпосылки для создания нового типа перестраиваемых лазеров на красителях. В этом новом типе лазерных источников компактные полупроводниковые лазерные диоды могут быть использованы для накачки активной среды на основе лазерных красителей. Именно развитию этого *актуального* направления посвящена данная диссертационная работа.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, одного приложения и изложена на 122 страницах. Список литературы содержит 138 наименований.

Во введении представлена достаточно информативная справка об использовании лазерных диодов в качестве источников света для оптической накачки перестраиваемых лазеров. Здесь обоснована актуальность предпринятых в диссертации исследований в области лазеров на красителях с диодной накачкой; сформулированы цели и задачи работы, положения, выносимые на защиту, а также научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Наконец, указан личный вклад автора, представлен список публикаций по теме диссертации и информация об апробации работы на конференциях и семинарах.

В первой главе представлен обзор литературы по тематике диссертации. Приводятся основные сведения о лазерах на красителях, включая твердотельные (полимерные) лазеры на красителях. Автором охвачены основные работы по перестройке длины волны генерации и получению ультракоротких импульсов. Здесь также обращается внимание на области применения, где лазеры на красителях практически незаменимы. Это, например, спектроскопия и лазерное разделение изотопов, где часто возникает необходимость в генерации излучения с произвольно заданной длиной волны, соответствующей узкой спектральной линии. Также приводится обзор литературы по источникам накачки перестраиваемых лазеров, включая лазерные диоды.

Во второй главе диссертации описаны исследования генерационных характеристик для впервые синтезированных красителей. Основная цель этих исследований – это поиск красителей, перспективных для диодной лазерной накачки. Это новые красители для лазерной генерации в оранжевом и красном спектральном диапазоне. В данной главе описываются схемы измерения кривых перестройки длины волны излучения, пороговой энергии

накачки и КПД лазеров на основе новых красителей. Здесь же приводится сравнение лазерных характеристик новых веществ с широко известными красителями (Родамин 6Ж, DCM и др.). Исследования, представленные в этой главе, показали высокую эффективность и широкий диапазон перестройки длины волны (более 100 нм) для ряда новых красителей, часть из которых была отобрана для экспериментов с диодной лазерной накачкой.

Третья глава посвящена созданию лазера на красителях с поперечной оптической накачкой лазерными диодами, генерирующими в синем спектральном диапазоне (445 нм). Отбор лазерных красителей, обладающих наименьшими порогами генерации, произведен на основе результатов по изучению накачки образцов импульсами (20 нс) вспомогательного лазера на красителе кумарин 120 (453 нм), имитирующего излучение лазерного диода на близкой длине волны. Для последующего исследования отобранных красителей были использованы 3 лазерных диода NDB7K75 производства фирмы Nichia с импульсной мощностью до 5 Вт при длительности импульса 200 нс. Накачка производилась с частотой импульсов 2 Гц через стенку кварцевой кюветы в область полного внутреннего отражения излучения, генерируемого активной средой с красителем на границе раздела кювета/растворитель. Выбор растворителя (бензиловый спирт) обеспечивал оптимальную для проведения экспериментов геометрию распространения лучей в зоне полного внутреннего отражения и удобное расположение элементов резонатора. Трехзеркальная схема резонатора с частичной компенсацией астигматизма позволила эффективно использовать излучение накачки от нескольких диодов и позволила проводить исследования лазерной генерации, как в широкополосном, так и в селективном резонаторах. В лазере на красителях кумарин 540А и DCM получены импульсы генерации длительностью 140 нс и энергией 0,3 мкДж. Общий диапазон перестройки длины волны генерации, при использовании растворов и нескольких красителей, составил около 200 нм (от 497 нм до 699 нм), а дифференциальный КПД лазера на красителе кумарин 540А (для широкополосной схемы) составил 18 %.

В четвертой главе описан прототип лазера на красителях и эксперименты в геометрии с продольной накачкой импульсами зеленого (513 нм) излучения от двух лазерных диодов NDG7475 фирмы Nichia с пиковой мощностью до 2 Вт. Следует отметить, что эксперименты по

накачке зелеными диодами являются не только пионерскими, но и содержат интересные технические решения. Для сведения пучков накачки от 2-х диодов на кювету с красителем под небольшим углом использовалась схема с поляризационным делителем. Кювета с раствором красителя (в основном использовался этанол) устанавливалась в трехзеркальном резонаторе. В результате изучены КПД, пороги возбуждения генерации, дифференциальные КПД в широкополосном резонаторе, а также кривые перестройки для различных красителей класса родаминов, пиррометенов и пиранов в селективном резонаторе. Для красителя пиррометен 567 получены рекордные для диодной накачки характеристики: длительность импульсов 170 нс, энергия генерации 0,23 мкДж, расходимость лазерного пучка 0,5 мрад. Диапазон перестройки длины волны генерации с использованием различных красителей составил 145 нм (от 537 нм до 682 нм), КПД в селективном резонаторе – 25 %, а дифференциальный КПД в широкополосном резонаторе – 45 %.

В пятой главе приведены результаты исследования генерационных характеристик наиболее эффективных лазерных красителей в полимерных матрицах в лазерной схеме с 3-х зеркальным резонатором и квазипродольной геометрией накачки, используя лазерные диоды, излучающие в зеленой области спектра (513 нм). Активным элементом являлся триплекс из двух стекол и слоя полимера с красителем. Приведены составы полимерных матриц, демонстрирующих наилучшую эффективность. Лучшие результаты были получены на красителях класса пиррометенов. Параметры импульсов перестраиваемого полимерного лазера на красителе пиррометен 580 следующие: длительность 380 нс, энергия генерации до 0,23 мкДж, расходимость 0,5 мрад. Дифференциальный КПД в широкополосном резонаторе для различных полимерных матриц составил от 25 % до 42 %, что в несколько раз превышает литературные данные по эффективности для полимерных лазеров с диодной накачкой. Приведены кривые перестройки для трех красителей класса пиррометенов в различных полимерных составах и результаты измерений их фотостойкости. Лучшую фотостойкость показал краситель пиррометен 597, для него энергия генерации падает вдвое после сто тысяч импульсов накачки в одну и ту же область. Впервые была реализована перестройка длины волны генерации в полимерном лазере на красителях в широком спектральном диапазоне (от 545 нм до 607 нм).

Исследованные О.А. Бурдуковой полимерные ЛК по многим лазерным характеристикам превосходят известные полимерные ЛК с диодной накачкой.

В шестой главе описаны эксперименты по получению ультракоротких импульсов в лазере на красителе родамин 6Ж с квазипродольной диодной накачкой импульсами зеленого излучения (513 нм). В экспериментах с пассивной синхронизацией мод насыщающийся поглотитель DODCI добавлялся в кювету с активным веществом, а для накачки использовались импульсы длительностью 400 нс. В этой схеме при частичной синхронизации мод были получены цуги субнаносекундных импульсов генерации (по 2-3 импульса на периоде). При синхронной накачке красителя короткими (~ 1 нс) импульсами полупроводниковых лазеров с частотой 220 МГц получены цуги из одиночных импульсов: длительность цуга 140 нс, длительность отдельного импульса ~100 пс. Представлены осциллограммы и денситограммы (со скоростной стрик-камеры) импульсов генерации лазера на красителе, подтверждающие режим синхронизации продольных мод.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

О.А. Бурдукова в процессе работы над диссертацией получила ряд новых научных результатов. К числу наиболее существенных результатов, обладающих несомненной новизной, следует отнести получение рекордных значений КПД в лазерах на красителях при полупроводниковой накачке. Для жидкостных и полимерных лазеров на красителях получены КПД относительно поглощенной энергии накачки до 25 % и дифференциальный КПД до 45 %. При этом для жидкостных и полимерных лазеров на красителях с диодной накачкой продемонстрирован значительный диапазон перестройки длин волн (до 200 нм).

Достоверность и обоснованность результатов исследований, выводов диссертации и положений, выносимых на защиту, не вызывает сомнений. Полученные автором экспериментальные результаты поддержаны теоретическим анализом примененных лазерных схем и совпадением расчетных значений параметров лазеров и резонаторов с данными эксперимента. Результаты апробированы автором на многочисленных конференциях и опубликованы в ведущих физических изданиях. Так, основные результаты были доложены О.А. Бурдуковой лично на 16 международных и всероссийских конференциях, школах-конференциях.

Полученные в работе результаты опубликованы в 10 печатных изданиях, 7 из которых изданы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК и индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, 3 – в тезисах конференций.

Научная и практическая значимость диссертационной работы заключается в разработке и создании первых эффективных перестраиваемых лазеров на красителях, накачиваемых лазерными диодами. Полученные в диссертации результаты открывают путь к созданию недорогих, компактных и эффективных лазерных источников, позволяющих осуществлять перестройку длины волны генерации в желто-зеленой области спектра (500 нм — 700 нм) и получать ультракороткие импульсы.

Диссертационная работа выполнена в Физическом Институте им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук. Все основные результаты работы получены О.А. Бурдуковой лично либо при непосредственном участии автора.

Переходя к общей оценке диссертационной работы, следует отметить, что О.А. Бурдукова выполнила большое и интересное исследование по лазерам на красителях, получив ряд новых в этой области результатов, которые открывают новые возможности создания компактных лазеров на красителях. Представленные в диссертации материалы свидетельствуют об авторе как о квалифицированном научном работнике, владеющим как техникой эксперимента с лазерами, так и средствами теоретического анализа полученных экспериментальных данных. Диссертация написана хорошим литературным языком и практически свободна от стилистических и грамматических ошибок. К качеству рукописи и оформлению работы существенных замечаний нет.

Несмотря на общую положительную оценку работы, имеются следующие замечания:

1. Вспомогательные результаты исследования красителей, изложенные в Главе 2, а также в Главе 3 (раздел 3.3), получены в условиях больших толщин активного слоя (5, 8, 10 мм, стр. 26, 27, 44) с оптическим пропусканием около 0.1%. В то же время, последующие исследования были выполнены в условиях существенно меньших размеров активной области поглощения (~ 20 мкм на уровне $1/e$, стр. 4). Таким образом, концентрации растворов красителей в условиях с диодной накачкой

были существенно выше тех, которые рассмотрены в Главах 2,3. В этом случае не очевидно, что полученные вспомогательные генерационные характеристики могут быть автоматически использованы для отбора наиболее эффективных красителей в экспериментах с диодной накачкой. Было бы полезным, если бы автор аргументировал предположение о не принципиальном изменении лазерных свойств растворов красителей при столь значительном изменении их концентраций.

2. Зависимости энергии лазерной генерации от энергии импульса накачки, представленные в Главах 2 – 3 (например, рис. 3.15), имеют выраженный нелинейный характер с сильно различающимися производными при разных уровнях накачки. При этом, из представленных зависимостей (например, кривая 25 на рис. 3.15) не очевидно (исключение составляют лишь данные в Главах 4,5), что начальные участки могут быть интерполированы к ненулевому значению энергии накачки. В этих условиях неизбежно возникает вопрос о критерии и точности определения порога возбуждения генерации, а также о критерии определения дифференциального КПД. К сожалению, эти критерий сформулированы в работе слишком качественно – без соответствующей убедительной демонстрации начального участка, где можно было бы видеть не только порог, но и судить о точности его определения.
3. В работе широко используются полуволновые пластинки для поворота плоскости поляризации излучения накачки. Однако, компактность полупроводниковых лазеров позволяет осуществить поворот плоскости поляризации чисто механически (поворотом лазерного диода) и тем самым исключить из оптической схемы полуволновые пластинки. Таким образом, остается неясным, с чем связано применение дополнительного оптического элемента. Очевидно, что в случае лазерных диодов, из-за отсутствия аксиальной симметрии распределения интенсивности по сечению пучка, чисто механический поворот мог повлечь изменение геометрии накачиваемой области, но этот момент в работе не обсуждается.
4. Исследование временных профилей импульса генерации (рис. 3.16, 4.6, 5.8) показало заметное падение интенсивности генерации при

отсутствии падения интенсивности в импульсе накачки. Этому, на мой взгляд, очень важному результату в работе уделено очень мало внимания. При этом, в разных ситуациях даны различные и, на мой взгляд, не убедительные объяснения, связанные либо с термооптическими, либо с акустооптическими искажениями области накачки. В данном случае совсем не обсуждается возможная роль, например, триплет-триплетного поглощения или иных механизмов утечки энергии возбуждения. Работу, несомненно, украсило бы наличие разумной физической модели, объясняющей как существенную задержку (~50 нс), так и снижение интенсивности генерируемого импульса при постоянном уровне накачки.

5. Несмотря на очень ясное изложение, в работе присутствует некорректная терминология. Например, на стр. 5 диапазон длин волн от 540 до 680 нм назван «желто-зеленым», тогда как длина волны 650 нм соответствует глубокому красному цвету. Часто толщина слоя раствора красителя чисто терминологически отождествляется с «толщиной слоя красителя». Например, на стр. 26 указано, что раствор заливался в кювету с «толщиной слоя красителя 5 мм», в то время, как известно, что из-за большого сечения поглощения даже слои красителя с толщиной в субмикронном диапазоне практически полностью поглощают свет.

Перечисленные замечания никоим образом не уменьшают ценность работы О.А. Бурдуковой. Работа производит очень сильное впечатление как высоким качеством, так и важностью полученных результатов. Это уникальный случай, когда работа, по сути, может выступать в качестве надежного справочника по лазерным свойствам большого ассортимента новых красителей. Что касается результатов, связанных с созданием оригинальных прототипов лазерных устройств с диодной накачкой и исследованием их свойств, то они заслуживают самой высокой оценки. Как уже отмечалось, работа имеет выраженную практическую значимость. В этом смысле особенно хотелось бы отметить результаты с полимерным слоем с красителем, а также реализацию режима синхронизации мод.

Автореферат диссертации полно и объективно отражает ее содержание, а положения, выносимые на защиту, соответствуют основным результатам работы.

Диссертация Бурдуковой Ольги Александровны «Лазеры на красителях видимого спектрального диапазона с полупроводниковой накачкой» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая удовлетворяет всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор, Бурдукова Ольга Александровна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – Оптика.

Отзыв составил главный научный сотрудник лаборатории жидких кристаллов Института кристаллографии им. А.В. Шубникова Федерального научно-исследовательского центра «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук, доктор физико-математических наук

Палто Сергей Петрович.

«19» января 2021 г.

119333, г. Москва, Ленинский проспект, д. 59,
тел.: +7-(495)-330-78-47
e-mail: serguei.palto@gmail.com

Подпись Палто Сергея Петровича удостоверяю.

Ученый секретарь Федерального научно-исследовательского центра
«Кристаллография и фотоника» Российской академии наук, к.ф.-м.н.

Ладинова Любовь Александровна

119333, г. Москва, Ленинский проспект, д. 59
тел.: +7-(499)-135-62-00
e-mail: cp.secr@crys.ras.ru



Список основных научных публикаций главного научного сотрудника Института кристаллографии им. А.В. Шубникова Российской академии наук, доктора физико-математических наук Палто Сергея Петровича по теме диссертации Бурдуковой Ольги Александровны «Лазеры на красителях видимого спектрального диапазона с полупроводниковой накачкой», представленной к защите на соискание ученой степени физико-математических наук по специальности 01.04.05 - «Оптика».

1. N.M. Shtykov, **S.P. Palto**, B.A. Umanskii, D.O. Rybakov and I.V. Simdyankin. Fluorescence and lasing in an electric-field-induced periodic structure of a cholesteric liquid crystal. *Quantum Electronics* 49(8), 754(2019).
2. **S.P. Palto**, N.M. Shtykov, I.V. Kasyanova, B.A. Umanskii, A.R. Geivandov, D.O. Rybakov, I.V. Symdyankin, V.V. Artemov, M.V. Gorkunov. Deformed lying helix transition and lasing effect in cholesteric LC layers at spatially periodic boundary conditions. *Liquid Crystals* 47(3), 384–398(2019).
3. N.M. Shtykov, **S.P. Palto**, B.A. Umanskii, D.O. Rybakov, I.V. Simdyankin. Amplification of the Fluorescence Propagating in the Waveguide Regime in a Planar Layer of NLC. *Crystallography Reports* 64(2), 305–310(2019).
4. N.M. Shtykov, **S.P. Palto**, B.A. Umanskii, D.O. Rybakov, I.V. Simdyankin. Waveguide amplification of dye fluorescence in NLC. *Photonics Letters of Poland* 10(4), 106–108(2018).
5. Н.М. Штыков, **С.П. Палто**, Б.А. Уманский, А.Р. Гейвандов. Исследования лазерной генерации света в жидкокристаллических системах с микрорешетками. *Кристаллография* 63(4), 606–614(2018).
6. Н.М. Штыков, **С.П. Палто**, Б.А. Уманский, А.Р. Гейвандов. Лазерная генерация света слоем нематического жидкого кристалла в ячейке с системой встречно-штыревых электродов. *Квантовая электроника* 45(4), 305–311(2015).